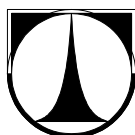


# **TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

---

**Fakulta strojní**



## **Litina s kuličkovým grafitem s vyšším obsahem Si pro automobilový průmysl**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Miroslava Schořová**

**2008**

# TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

## Fakulta strojní

Studijní program B2341 - Strojírenství

Materiály a technologie  
zaměření strojírenská metalurgie

Katedra strojírenské technologie  
zaměření strojírenská metalurgie

**Litina s kuličkovým grafitem s vyšším obsahem Si pro automobilový průmysl**

**Spheroidal graphite iron with higher content Si for automobiles industrie**

Miroslava Schořová

KSP – SM – B14

Vedoucí bakalářské práce: prof. Ing. Iva Nová, CSc. – *TU v Liberci*

Konzultant: Ing. Jan Šmrha – *TU v Liberci*

Rozsah práce a příloh:

Počet stran 41

Počet tabulek 8

Počet obrázků 13

Datum: 4.1.2008

# ANOTACE

**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

**Fakulta strojní**

**Katedra strojírenské technologie**

**Oddělení strojírenské metalurgie**

Studijní program: B2341 – Strojírenství

Student: Miroslava Schořová

Téma práce: Litina s kuličkovým grafitem s vyšším obsahem Si pro automobilový průmysl

Spheroidal graphite iron with higher content Si for automobiles industrie

Číslo BP: KSP-SM-B14

Vedoucí: prof. Ing. Iva Nová, CSc. – *TU v Liberci*

Konzultant: Ing. Jan Šmrha – *TU v Liberci*

Abstrakt: Bakalářská práce se zabývá zkoumáním litiny s kuličkovým grafitem s vyšším obsahem Si. Dále pak zkoumá mechanické vlastnosti této litiny.

Abstract: Bachelors works deal with investigation spheroidal graphite iron with higher content Si. Next then inquiry into mechanical properties these iron.

**Místopřísežné prohlášení:**

Místopřísežně prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracovala samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci, 4. ledna 2008

.....

Miroslava Schořová

Třebízského 561/22

Kosmonosy

## P o d ě k o v á n í

Děkuji všem, kteří svou pomocí přispěli při vzniku této bakalářské práce. Zejména prof. Ing. Ivě Nové, CSc. a Ing. Janu Šmrhovi za vedení a odborné rady a připomínky.

## OBSAH

<b>1.</b>	<b>ÚVOD</b>	<b>8</b>
<b>2.</b>	<b>REŠERŠNÍ ČÁST PRÁCE</b>	<b>10</b>
2.1	Přehled grafitických litin	10
2.1.1	Litina s červíkovitým grafitem (LČG)	13
2.1.2	Litina s lupínkovitým grafitem (LLG)	14
2.1.3	Litina s kuličkovitým grafitem (LKG)	15
2.2	Charakteristika litiny s kuličkovitým grafitem	16
2.3	Vliv primárních prvků a křemíku (Si) na změnu struktury	20
2.4	Litina s kuličkovitým grafitem a zvýšeným obsahem Si	21
2.4.1	Metalurgie litiny s kuličkovitým grafitem s vyšším obsahem Si	22
2.4.2	Mechanické vlastnosti litiny s kuličkovitým grafitem a zvýšeným obsahem Si	23
<b>3.</b>	<b>EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST PRÁCE</b>	<b>25</b>
3.1	Popis výroby formy	25
3.2	Příprava a tavení kovové vsázky	27
3.3	Odlití taveniny do formy	28
3.4	Vyhodnocení získaných odlitků	31
3.4.1	Metalografický výbrus	31
3.4.2	Měření tvrdosti odlitků	34
<b>4.</b>	<b>DISKUSE VÝSLEDKŮ</b>	<b>36</b>
<b>5.</b>	<b>ZÁVĚR</b>	<b>38</b>
<b>6.</b>	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY</b>	<b>39</b>

## **Seznam použitých zkratk a symbolů**

HB	- tvrdost dle Brinella
LČG	- litina s červíkovitým grafitem
LKG	- litina s kuličkovitým grafitem
LLG	- litina s lupínkovitým grafitem
GJV	- litina s červíkovitým grafitem
GJS	- litina s kuličkovitým grafitem
GJL	- litina s lupínkovitým grafitem
R <sub>m</sub>	- mez pevnosti v tahu [MPa]
x	- výběrový koeficient
s	- směrodatná odchylka
v	- variační koeficient

## 1. ÚVOD

Železo je jedním z nejhojněji se vyskytujících materiálů na Zemi, přičemž je nejvíce využíváno ze všech kovových materiálů. Pozvolný úbytek celosvětových zásob surovin a zvyšování jejich cen vedou ke snaze o technické a ekonomické využívání surovinových zdrojů. V technické praxi to znamená používání materiálů umožňujících dosažení vyšších užitných vlastností. Mezi ně patří i litina s kuličkovým grafitem, která má také značné uplatnění při výrobě dílů automobilového průmyslu.

Tato bakalářská práce je zaměřená právě na litinu s kuličkovým grafitem (LKG) se zvýšeným obsahem křemíku (Si), která byla v poslední době zařazena do skupiny litin s kuličkovým grafitem.

V roce 2004 bylo ve světě vyrobeno téměř 19 milionů tun odlitků z litiny s kuličkovým grafitem, což je více než 46% z výroby odlitků litiny s lupínkovým grafitem (LLG). V USA byly vyrobeny 4 mil. tun, to je 95% z výroby odlitků z LLG, v Číně 5,6 mil. tun, to je 50%, v Německu 1,42 mil.tun to je 59%, ve Francii 1 mil. tun, to je 106%, ve Španělsku 551 tis.tun, to je 109% z výroby odlitků z LLG a v Rakousku 128 tis.tun, to je dokonce 256% z výroby odlitků z litiny [1].

V České republice bylo v roce 2004 vyrobeno 48,3 tis. tun odlitků z tvárné litiny, což je necelých 17% z výroby odlitků ze šedé litiny. Jako další srovnání možno uvést, že v USA činí výroba odlitků z tvárné litiny 16 kg na hlavu obyvatele, v Německu 17,7 kg na hlavu obyvatele, ve Francii 20 kg na hlavu, v Rakousku 16 kg na hlavu obyvatele ale v České republice pouhé 4 kg na hlavu obyvatele. Z toho je zřejmé, že v České republice je výroba tvárné litiny i po více než 55 letech od jejího objevu stále v plenkách [1].

V minulosti byla preferována výroba ocelí na odlitky z LKG byla u nás do jisté míry materiálem dražším než-li ocel a zároveň těžko dostupným. Za těchto podmínek se informace o tvárné litiny šířili jen v omezeném okruhu. V současné době a hlavně v budoucnosti se budou slévárny potýkat se stále větší konkurencí (hlavně z východních zemích a Číny) a také se stále zvyšující se poptávkou po tvárné litině, která je dána růstem automobilového průmyslu.

V současné době nachází uplatnění v automobilovém průmyslu i litina s kuličkovým grafitem s vyšším obsahem křemíku (Si). Problematikou výroby odlitků z této litiny se



v současné době zabývá KSP – TU v Liberci v rámci řešení výzkumného záměru MSM 4674788501. V tomto smyslu je řešena i tato bakalářská práce, která řeší LKG s vyšším obsahem Si, s ohledem na přípravu, metalurgii a odlití taveniny a též s ohledem na strukturu získaných odlitků jednoduchého deskovitého tvaru s různou tloušťkou stěn.

## 2. REŠERŠNÍ ČÁST PRÁCE

### 2.1 Přehled grafitických litin

Litiny jsou slitiny železa, uhlíku, křemíku, manganu, síry, fosforu, popř. dalších prvků, kdy obsah uhlíku je větší než 2,14 %. Struktura litin je tvořena primární fází a eutektikem.

Obecně se litiny dělí na dvě velké skupiny:

- a) litiny bílé
- b) litiny grafitické, které mají značné uplatnění ve slévárenství

Přechodový typ mezi grafitickými litinami tvoří tzv. maková litina, která obsahuje jek grafitické, tak metastabilní eutektikum. Tato struktura se obvykle pokládá za nežádoucí.

#### Litiny bílé

Tyto litiny se dnes téměř nevyrábějí. Dříve byla bílá litina základem pro výrobu temperované litiny. Bílá litina tuhne podle metastabilní soustavy Fe-C a základem struktury je ledeburit, resp. ledeburitický cementit, který je velmi tvrdý. Temperování je dlouhodobé žhání odlitků z bílé litiny při teplotě cca 950 až 1050°C, kdy dochází k rozkladu cementitu  $\text{FeC} \rightarrow 3\text{Fe} + \text{C}_{(\text{grafit})}$ . Tím vzniká vločkový grafit, který je rozložen v základní kovové hmotě litina (matrici). Základní hmota temperované litiny je závislá na způsobu temperování (na černý lom; na bílý lom; na perlit). Při temperování na černý lom vzniká matrice feritická, při temperování na bílý lom vzniká matrice feriticko-perlitická a poslední způsob je temperování za vzniku perlitické matrice. Temperované litiny se vyznačují velmi dobrými mechanickými vlastnostmi, temperovaná litina s perlitickou maticí dosahuje pevnost v tahu cca 700 MPa[2].

Dnes temperovanou litinu nahrazují kvalitní litiny. Takové, které jsme schopni vyrobit pouze odlitím (litina s kuličkovým nebo červíkovým grafitem) bez následného a finančně náročného tepelného zpracování. Jen vyjíměčně se tepelně zpracovává litina s kuličkovým grafitem – kalení v solných lázních za vzniku bainitické matrice. Takto zpracovaná LKG dosahuje pevnost v tahu cca 1200 MPa.

Bílou litinu můžeme také nechtěně získat v tenké části odlitku při jeho výrobě z litiny s lupínkovým grafitem (to závisí na rychlosti tuhnutí a chladnutí odlitku, resp. na jeho tloušťce stěny i na jeho chemickém složení), viz. Mauerův nebo Klingensteinův strukturní diagram [2]. Jelikož se tato práce zabývá druhem grafitické litiny nebudou zde bílé litiny zmiňovány.

## Litiny grafitické

Při tuhnutí podle stabilního systému vzniká grafitické eutektikum, které je tvořeno austenitem a uhlíkem, vyloučeným v některé z morfologických forem grafitu. Tyto litiny se nazývají litiny grafitické. Přejímový typ mezi grafitickými a bílými litinami tvoří tzv. maková litina, která obsahuje jak grafitické, tak metastabilní eutektikum. Tato struktura se obvykle pokládá za nežádoucí.

Základním kritériem pro určení druhu litin je zejména tvar vyloučeného grafitu. Názvy jednotlivých druhů litin, značky a číselné označení zde uvedené, respektují normu ČSN EN 1560.

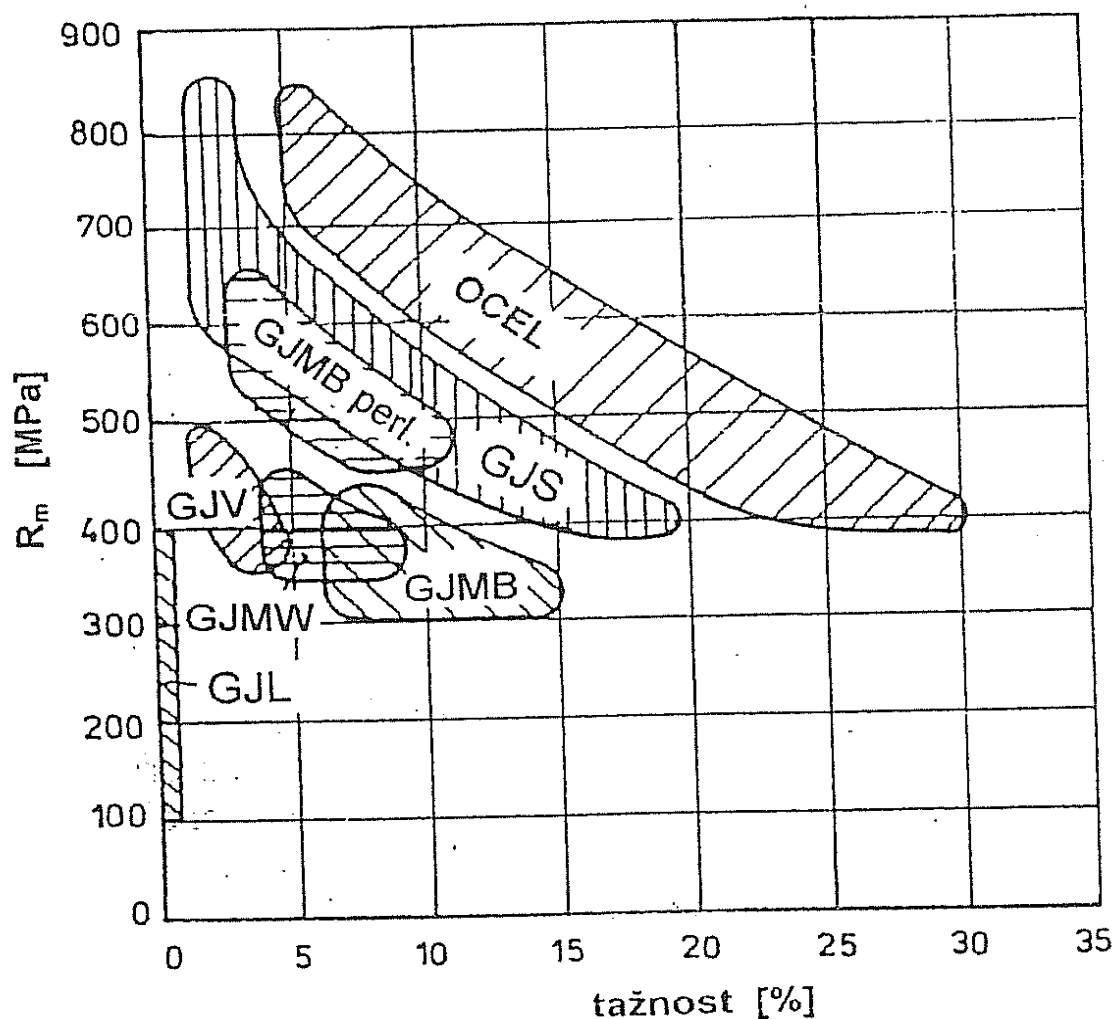
Podle tvaru grafitu se dělí litiny na následující třídy:

- Litina s lupínkovitým grafitem - (LLG, resp. EN GJL);
- Litina s kuličkovitým grafitem (LKG, resp. EN GJS);
- Litina s červíčkovitým grafitem (LČG, resp. EN GJV);

Tvar a rozložení grafitu mají zásadní vliv na mechanické vlastnosti litin. Samotný grafit má velmi malou pevnost. Proto grafit tím, že zmenšuje nosný průřez základní kovové hmoty, snižuje pevnost litiny. Současně na koncích útvarů grafitu dochází ke koncentraci napětí – grafit působí vrubovým účinkem. Čím ostrohranější je zakončení útvarů grafitu, tím větší je vrubový účinek. Z tohoto hlediska je nejméně výhodný lupínkový grafit, naopak nejpriznivější je grafit kuličkový. Proto má litina s kuličkovým grafitem podstatně vyšší mechanické vlastnosti, než litina s lupínkovým grafitem. Litina s červíkovým grafitem a vločkovým grafitem svými vlastnostmi leží mezi těmito krajními body [4]. Některé z vlastností jsou značně závislé i na teplotě. U litin se standardně hodnotí následující mechanické vlastnosti:

- **pevnost** – mez pevnosti v tahu  $R_m$
- **plastické vlastnosti** – tažnost  $A_5$
- **dynamické vlastnosti** - nárazová práce na tělesech s V-vrubem, obvykle pouze u GJS
- **tvrdost** – hodnota tvrdosti HB

Mechanické vlastnosti nelegovaných litin jsou uvedeny na *obr. 2-1*.



Obr. 2-1 Mechanické vlastnosti nelegovaných litin

Historicky nejstarším a dnes ještě dosti používaným druhem litiny je litina s lupínkovým grafitem. V podstatě až do druhé světové války byla jedním zástupcem grafitických litin používaných v praxi. Výzkum a vývoj litin všech typů přinesl nové možnosti použití litin všeobecně a zaznamenal značný pokles produkce oceli na odlitky a její nahrazování litinami. Zároveň došlo i ke snižování podílu litiny s lupínkovým grafitem z celkové produkce litin a přenesení pozornosti na grafitické litiny s jiným typem grafitu. V tabulce 2.1 je uveden přehled objemu výroby slitin železa v letech 1989 až 2000, zde je patrný trend poklesu výroby temperované litiny a nárůst produkce zejména u litiny s kuličkovým grafitem. To lze vysvětlit propracovaností technologie její výroby a současně její nárůst a uplatnění v automobilovém průmyslu [4].

*Tabulka 2.1 Přehled objemu výroby slitin na bázi železa pro léta 1989 a 2000 [6]*

stát	LLG[%]		LKG[%]		temp. lit. [%]		oceli [%]		ostatní [%]	
	1989	2000	1989	2000	1989	2000	1989	2000	1989	2000
USA	47	39,1	27,6	29,6	2,5	1,4	9,8	9,3	13,1	20,6
JPN	50,7	42,0	25,1	30,9	3,5	1,5	5,8	4,2	14,9	21,6
Něm.	55,1	48,0	21,2	28,9	2,9	0,8	5,3	3,6	15,5	18,7
ČR	71,7	60,6	2,8	7,3	2,3	2,3	21,5	16,8	1,7	13,0

### 2.1.1 Litina s červíčkovitým grafitem – LČG

Dříve nazývaná jako litina vermikulární. Červíčkovitý grafit má podobnou morfologii jako grafit lupínkovitý. Ve srovnání s GJL jsou však útvary grafitu kratší, tlustší a jejich konec bývá zaoblený. Vermikulární litina obvykle obsahuje též určité množství lupínkového nebo kuličkovitého grafitu. Vermikulární litina se modifikuje nízkým obsahem Mg [4].

Tato litina se mnohdy vyrábí záměrně a to o poměru min. 80 % červíčkovitého grafitu a max. 20 % nedokonale nebo pravidelně zrnitého grafitu [4]. Chemické složení těchto litin se pohybuje: (3,5 až 3,8) % C; (2,4 až 2,7) % Si, 0,6 % Mn; max. 0,02 S [2]. Mechanické vlastnosti této litiny stojí mezi vlastnostmi litiny s lupínkovým a kuličkovým grafitem. [7] Jsou základní 3 typy LCG. První typ je LCG – feritická, která má pevnost v tahu 320 MPa, tvrdost 180 HB. Druhým typem je LCG – feriticko – perlitická, která vykazuje pevnost v tahu 400 MPa, tvrdost je 200 HB. Třetím typem je LCG – perlitická, pevnost v tahu je 450 MPa, tvrdost 250 HB. Modul pružnosti bývá 140 000 až 180 000 MPa [2].

Litina se používá v automobilovém průmyslu pro dynamicky namáhané díly. V současné době se hodí též jako náhrada dříve hojně používané temperované litiny. Z litiny s červíčkovitým grafitem se vyrábí výfuková potrubí osobních automobilů (např. Škoda Auto), ale v současné době i tenkostěnné bloky spalovacích motorů (např. Audi, 3,0 TDI, výkon 170 kW má vyroben blok motoru z této litiny a celková hmotnost motoru je 202 kg, což se řadí na špičku světové produkce v této kategorii) [2].

### 2.1.2 Litina s lupínkovitým grafitem – LLG

Litina s lupínkovým grafitem je slitina na bázi železa a uhlíku, přičemž uhlík je přítomen jako grafit, který je v podobě prostorových útvarů („stolité růže“), které se na metalografickém výbrusu jeví jako lupínky. Jejich délka je podstatně větší než jejich tloušťka a konec lupínků je ostrý. Každá částice grafitu totiž v základní hmotě působí jako místní koncentrátor napětí, narušující základní kovovou hmotu. Oblast připadající jednomu prostorovému útvaru grafitu se nazývá eutektická buňka. Tento typ litiny je nejobvyklejší typem litiny [3].

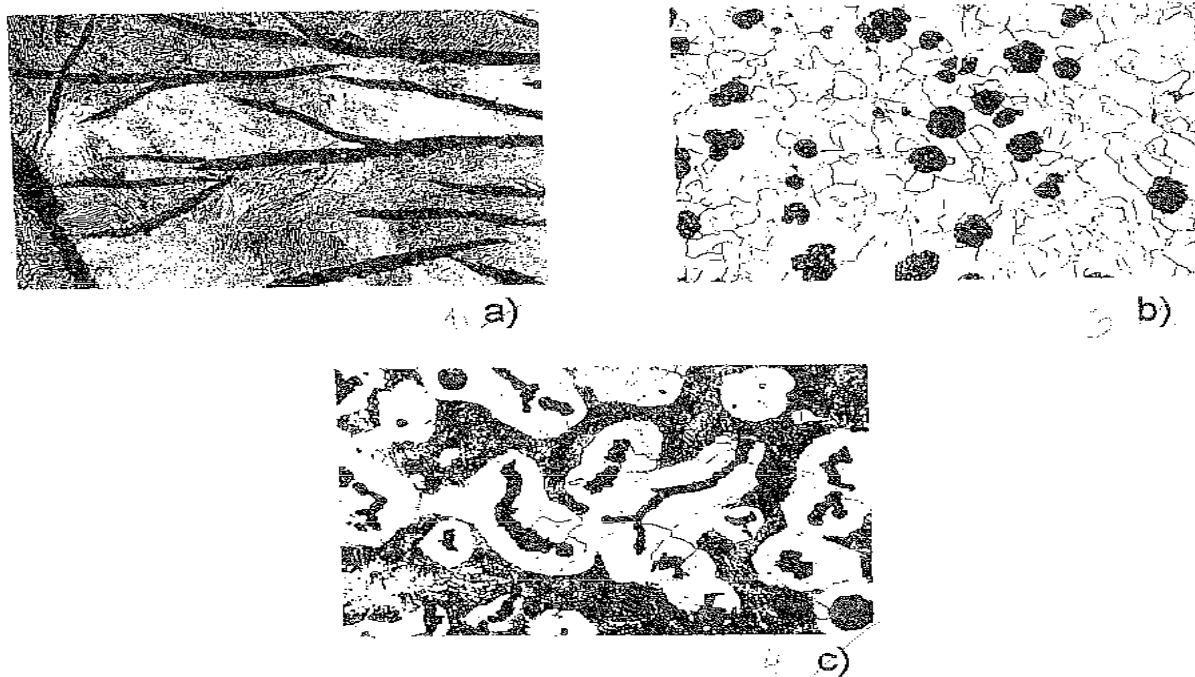
Mechanické vlastnosti LLG ovlivňuje kromě tvaru, velikosti, rozložení a množství grafitu, především chemické složení a rychlosti ochlazování litiny. Tyto dva faktory určují zejména konečnou podobu matrice litiny (podíl feritu a perlitu, popř. ledeburitu). Chemické složení ovlivňuje také polohu eutektického bodu, kterou určuje tzv. stupeň eutektičnosti (tzn. stupeň syčení Sc) [7]. Pro většinu účelů je požadována LLG s perlitickou hmotou. S roustoucím obsahem feritu a poklesem obsahu perlitu v základní hmotě klesá pevnost a tvrdost litiny.

Chemické složení litiny bývá: (2,8 až 3,6) % C, (1,4 až 2,8) % Si; (0,5 až 1,0) % Mn; (0,2 až 0,6) % P, (0,2 až 0,6) % P; max. 0,15 % S. Nejméně je kvalitní litina ČSN 42 2410, pevnost v tahu je 100 MPa, má velké lupínky grafitu a feritickou matici. Její tvrdost bývá 130 HB. Kvalitnější je litina ČSN 42 2415, pevnost v tahu je 150 MPa, tvrdost je 170 HB, struktura je feriticko – perlitická [2]. Tyto litiny jsou vhodné na tenkostěnné odlitky s tloušťkou stěny od 4 do 30 mm, nebo na odlitky, u kterých se nepožaduje záruka mechanických vlastností. Používají se pro výrobu součástí pecí, kotlů, roštů, odlitky na smaltování, vodovodní tvarovky, části textilních či polnohospodářských strojů, kanálové poklopy, mříže [7]. Litina ČSN 42 2420 bývá očkovaná, obvykle očkované 75 % ferosiliciem, čímž se zlepšují její vlastnosti. Pevnost v tahu je 200 MPa, tvrdost 200 HB. Struktura je feriticko – perlitická. Litina ČSN 42 2425 se vždy očkuje, pevnost bývá 250 MPa a tvrdost 220 HB, struktura je perliticko – feritická [2]. Z této litiny se odlévají odlitky, u kterých se požaduje záruka mechanických vlastností (pevnost v tahu a tvrdost). Nejčastěji se používají v automobilovém průmyslu a strojařském průmyslu. Jsou vhodné na převodové skříně, stojany lisů, soustruhy, frézky, motorové vložky, ozubená kola, motorové bloky, hlavy válců, písty, kompresorové válce, řemenice [7]. Mezi litiny s vysokou pevností patří litina

ČSN 42 2430, která má pevnost v tahu 300 MPa a tvrdost 260 HB, struktura této litiny je perlitická [2]. Tyto litiny se obvykle označují jako jakostní. Používají se na stojany těžkých lisů a obráběcích strojů, armatury, písty těžkých kompresorů, velká ozubená kola pastorky.

### 2.1.3 Litina s kuličkovitým grafitem – LKG

Dříve nazývaná jako litina tvárná, obsahuje grafit ve formě kuliček (globulí). Z hlediska vlastností litin je ideálním tvarem dokonalá kulička grafitu. Často se však vyskytují podoby grafitu jako „nedokonale zrnitý“. Eutektická buňka je oblast příslušející právě jednomu útvaru grafitu – jedné kuličce. Jelikož se právě na tento typ litiny zaměřuje tato bakalářská práce, bude LKG konkrétněji popsána v další části této práce (konkrétně v části 2.2).



Obr.2-2 Vyobrazení tvaru grafitu v jednotlivých druzích litin: a) LLG b) LKG c) LCG [3]

## 2.2 Charakteristika litiny s kuličkovitým grafitem

Grafit ve formě glubulí zmírňuje tohoto tvaru grafitu se dosahuje vhodnou modifikací taveniny před jejím odléváním. Mezi modifikační prvky (globurizátory grafitu) se řadí Mg, Ce, Y, prvky vzácných zemin [8]. Přidáváním očkovačla dosáhneme rovnoměrnosti struktury, především vyloučeného grafitu. Očkovačlo se do taveniny přidává těsně před odléváním. Z metalurgického hlediska to představuje vnesení dostatečného počtu krystalizačních zárodků, na kterých probíhá krystalizace grafitu. Podobně jako u LLG se nejedná pouze o jeden druh materiálu, ale řízením mikrostruktury lze dosáhnout širokého spektra vlastností výsledného materiálu. Rovnoměrně rozložený grafit kuličkovitého tvaru poskytuje LKG vysokou tažnost a pevnost srovnatelnou s většinou litých a tvářených ocelí, protože vrubový účinek kuličky grafitu na základní hmotu je v porovnání s lupínkem grafitu podstatně menší. Stejně jako u LLG má na mechanické vlastnosti vliv základní kovová hmota.

Obsah uhlíku a křemíku bývá vyšší, zlepšuje slévarenské vlastnosti a má vliv na mechanické vlastnosti (na pevnost matrice). Kromě uhlíku a křemíku se v litině vyskytuje i mangan. Mangan je velmi silný aktivátor karbidů, proto je jeho obsah ve slitině řízen, abychom předešli tvorbě karbidů v litém stavu. Jeho maximální obsah je řízený právě množstvím křemíku a tloušťkou stěny odlitku. Fosfor je prvek, který se vyskytuje ve všech vsázkových surovinách a vyskytuje se proto i v litinách. Vytváří fosfid železa ( $\text{Fe}_3\text{P}$ ), který segreguje do naposled tuhnoucích míst (hranice buněk). Tyto místa mohou obsahovat až dvojnásobek obsahu P a v tenkých odlitcích až jeho desetinásobek. Fosfid železa je velmi tvrdá a křehká fáze. Při obsahu P z 0,03 na 0,06 % může dojít ke snížení tažnosti litiny na polovinu. To má za následek i snížení houževnatosti, pevnosti, zvýšení popouštěcí křehkosti apod. Měl by se proto dodržet obsah fosforu menší než 0,04 %. Proto se doporučuje používat kvalitní vsázku, kde je fosforu minimum. Stabilizace perlitu ve struktuře a tím zvýšení pevnosti a tvrdosti litiny zabezpečují přísady jako je Sn, Mo, Cu, Ti, Mn, Ni a Cr, ze kterých mají negativní účinky P, Ti, Mn a Cr a z ekonomických důvodů není aktuální doporučovat Ni a Mo. Základní perlitizační přísadou přísadou jsou tedy Cu a Sn. Účinek cínu je asi desetinásobný oproti mědi. Má ale nevýhodu, že podporuje vznik mezibuňkového lupínkového grafitu. Proto se doporučuje jen 0,05 %. Na druhé straně je přidávání mědi bezpečné až do 2 % [7]. Chemické složení litiny bývá: (3,2 až 4,2) % C; (1,5 až 4,0) % Si; (0,4 až 0,8) % Mn; méně než 0,1 % P, 0,02 % V S; (0,05 až 0,1) % Mg [2].



Struktura litiny s kuličkovitým grafitem může obsahovat základní kovovou hmotu (matrici):

- a) feritickou;
- b) feriticko – perlitickou;
- c) perlitickou;
- d) bainitickou (ADI- izotermicky kalená LKG);
- e) austenitickou.

Jednotlivé druhy matrice závisí na podmínkách její výroby, popř. charakteru tepelného zpracování. Vlastnosti odlitků z LKG závisí na množství, velikosti a druhu grafitu (dokonalý a částečně zrnitý) a od složení základní matrice (poměr mezi feritem a perlitem). Množství a velikosti grafitu závisí u nelegovaných litin na množství uhlíku, křemíku a manganu, dále na rychlosti ochlazování (tloušťka stěny, materiál formy). V Porovnání s LLG má LKG větší pevnost, modul pružnosti, tvrdost (perlitická matrice), tažnost a nárazovou práci (feritická matrice) apod. [7]

Dle ČSN je litina označována jako ČSN 42 23XX. Nejméně kvalitní je litina ČSN 42 2303, která má strukturu feritickou, pevnost je 300 MPa, vykazuje vysokou tažnost 22 %, tvrdost je 150 HB. Litina ČSN 42 2304 má též feritickou matrici, pevnost je 400 MPa, tvrdost 180 HB, tažnost 15 %. Litina ČSN 42 2305 má matrici feriticko-perlitickou, pevnost v tahu 500 MPa, tažnost 7 % a tvrdost 200 HB. Litina ČSN 42 2306 má perliticko-ferlitickou matrici, pevnost v tahu 600 MPa, tažnost 3 %. Litina ČSN 42 2307 má matrici perlitickou, pevnost v tahu 700 MPa, tažnost 2 %, tvrdost 250 HB. Litina ČSN 42 2308 má matrici perliticko – bainitickou, pevnost v tahu 800 MPa, tažnost 2 %, tvrdost 280 HB. Dále je také ČSN 42 2340 – litina s kuličkovým grafitem žáruvzdorná [2].

Zvýšením mechanických vlastností LKG lze docílit i speciálním tepelným zpracováním – izotermickým kalením na bainitickou strukturu (v zahraničí se označuje ADI způsob), kde se dosahuje pevnosti litiny vyšší než je 1200 MPa [2]. Mechanické vlastnosti nejsou příliš závislé na uhlíkovém ekvivalentu, nýbrž na především na struktuře základní kovové hmoty. Litiny s feritickou strukturou mají velmi dobré plastické a dynamické vlastnosti, perlit způsobuje zvýšení pevnosti. Zvýšení podílu perlitu se dosahuje při vyšším obsahu manganu nebo pomocí legur, stabilizujících perlit (zejména Cu). U LKG je nutno udržovat co nejnížší obsah fosfor, karbidotvorných prvků a dalších nečistot, které významně snižují plastické vlastnosti [3].

Slévárenské vlastnosti jsou velmi dobré a zabíhavost je v porovnání s LLG téměř shodná. Smršťování během tuhnutí kompenzuje grafitická expanze, kdy vylučování uhlíku doplňuje objemové smrštění základní kovové hmoty. Litina s lupínkovým grafitem většinou u podeutektických litin vytváří během tuhnutí na povrchu odlitku pevnou a tuhou vrstvu a úzká krystalizační fronta se plynule posouvá k teplé ose odlitku. Tlak vyvolaný krystalizací eutektického grafitu je bez znatelného vlivu pevnosti formy využit ke kompenzaci objemového stažení během tuhnutí odlitku. Litina s kuličkovým grafitem naopak vytváří během tuhnutí slabou a pružnou vrstvu a tuhne v širokém objemovém pásmu prakticky najednou. Tenká povrchová vrstva není schopna zadržet tlak vzniklý grafitickou expanzí a proto využití tohoto tlaku k vyrovnání stahování během tuhnutí závisí hlavně na tuhosti použité slévárenské formy. Při dostatečně tuhé formě je expanzní tlak schopen účinně vyrovnat objemové stahování během tuhnutí. Při málo tuhé slévárenské formě dojde k nárustu objemu odlitku, což má za následek nutné dodávky tekutého kovu do odlitku z nálitku (proto je nutno tyto odlitky nálitkovat).

Na rozdíl od LLG je příprava taveniny LKG složitější a náročnější. Velký význam hraje kvalita vsázkových surovin a zodpovědný přístup k tzv. sekundární metalurgii (způsob modifikace a očkování). Při příliš vysokém obsahu především síry a kyslíku se totiž část modifikačního hořčíku v důsledku jeho afinity k těmto dvěma prvkům využije k odsíření a odkysličení taveniny. Zbývající část je pak použita ke sferoidizaci grafitu. Z tohoto důvodu je nutné udržovat nízké hladiny zejména síry (max. 0,02 %) a fosforu (max. 0,06 %) [6]. Je nutné zajistit odpovídající množství modifikátoru a očkovačů a jejich zapravení do tekutého kovu v relativně krátkém časovém intervalu, který zajistí správnou funkci těchto látek.

LKG je v současnosti nejpoužívanější litinou a je někdy používána místo ocelí na odlitky. Úspory, které tato litina přinese, nejsou zanedbatelné (úspora energie při tavení, úspora kovu) a mají některé vlastnosti lepší (menší měrná hmotnost, dobré kluzné vlastnosti, tlumící vlastnosti, lepší slévárenské vlastnosti, lehčí obrobiteľnost apod.). Podle použití je lze rozdělit do třech skupin.

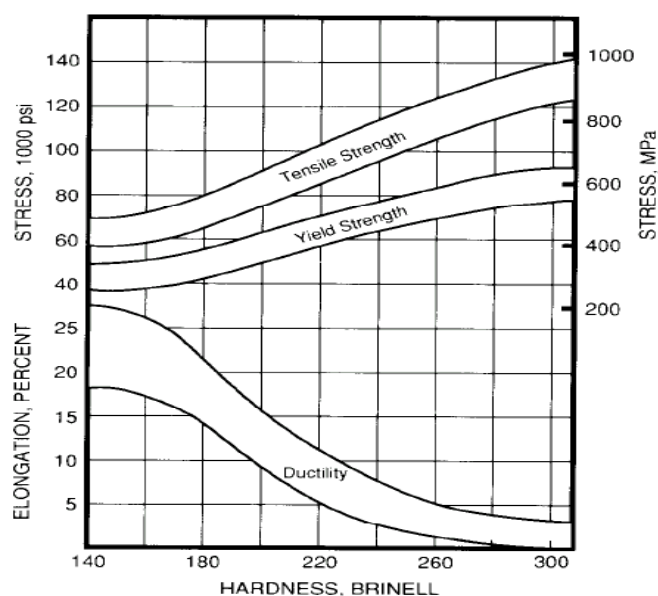
- litiny pro běžné použití
- litiny pro běžné použití pro práci při nízkých teplotách
- litiny s nejvyšší pevností

Litiny pro běžné použití jsou vhodné na odlitky dynamicky namáhané, u kterých se požaduje záruka mechanických vlastností a hlavně vysoké hodnoty plastických vlastností i při nízkých teplotách (např.  $-50^{\circ}\text{C}$ ) [7].

Litiny pro běžné použití pro práci za nízkých teplot. Tyto litiny jsou vhodné na odlitky dynamicky namáhané, v automobilovém průmyslu jako jsou vačkové, klikové hřídele, dále součástky na převodové skříně, motorové vložky a ozubená kola.

Litiny s nejvyšší pevností jsou určeny pro i pro dynamické namáhání součástí automobilového průmyslu.

Na *obr. 2-2* je uveden vztah mezi pevností, mezí kluzu, tažností a tvrdostí u LKG dle [6].



*Tensile Strenght-mez pevnosti, Yield Strenght-mez kluzu, Ductility-tažnost*

*Obr. 2-2 Vztah mezi pevností, mezí kluzu, tažností a tvrdostí u LKG [6]*

Z hlediska pevnostních vlastností tvoří litina s kuličkovým grafitem přechod mezi ocelí a litinou.

## 2.3 Vliv primárních prvků a křemíku (Si) na změnu struktury

Na mikrostrukturu a vlastnosti LKG působí mnoho činitelů, nejdůležitější z nich jsou:

- a) chemické složení;
- b) zpracování roztavené litiny;
- c) rychlost tuhnutí a rychlost ochlazování pevné fáze.

Chemické složení LKG je podobné jako složení LLG. Jedním z nejdůležitějších činitelů, jež má vliv na strukturu nebo strukturální změny grafitu a základní kovové hmoty a na její mechanicko-fyzikální vlastnosti.

Každý prvek má určitý vliv na strukturu tuhnoucích fází – morfologii grafitu, nebo na kovovou základní hmotu-mikrostrukturu.

Většina prvků přítomných v tvárné litině může být klasifikována podle jejich vlivu na mikrostrukturu. Tyto zahrnují: [1]

- **primární prvky – C, Si, Mn, P a S**
- **sferoidizační (primárn očukující – modifikační) prvky – Mg, prvky vzácných zemin, Ca, atd.**
- **legující prvky – Cu, Ni a Mo**
- **prvky zbytkové a pro určité účely, se speciálním záměrem – As, Bi, Pb, Sb atd.**
- **perlito- a karbidotvorné prvky – As, B, Cr, Sn a V**
- **plyny – H, N a O**

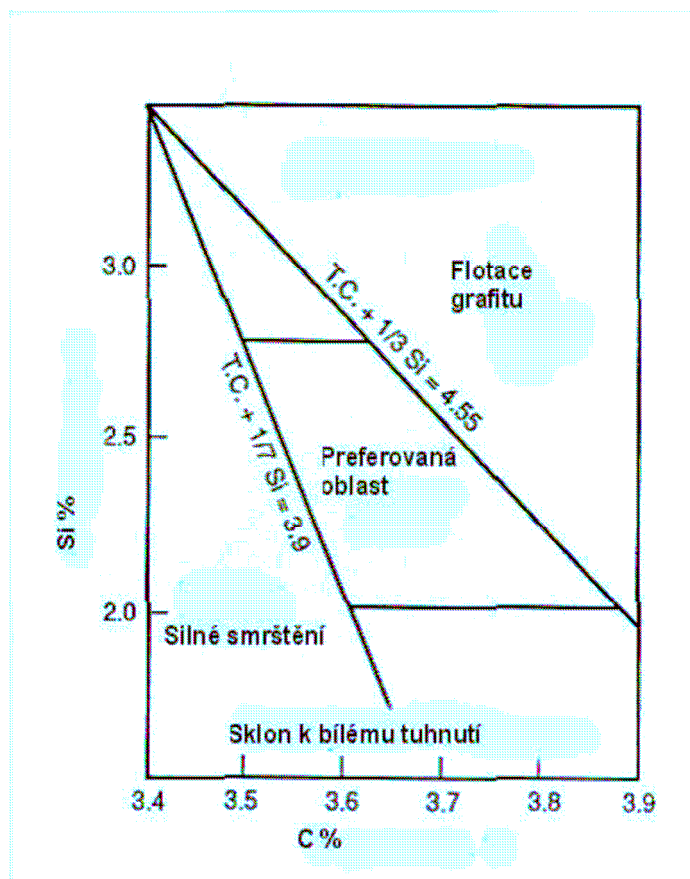
Hlavní prvky, jež se v tvárné litině vyskytují jsou mimo železa: uhlík, křemík, mangan, fosfor, síra a očukující – modifikační přísady, ve většině případů hořčík. V případě, že jsou pro výrobu tvárné litiny použity předslitiny obsahující jiné prvky, tak jsou v ní taktéž obsaženy. U legovaných, nebo speciálních litin to mohou být prvky: nikl, měď, molybden, cín, titan, chrom atd. Nikl a měď může do litiny přejít buď, jak uvedeno při výrobě z předslitin (Ni-Mg a Cu-Mg), nebo jako legující přísady; cer je při výrobě tvárné litiny vlastní očkovadlo a molybden, cín, titan, chrom stabilizátory perlitu, nebo jako legující přísady. Poslední skupinu tvoří prvky, jež mohou do litiny přejít z výchozích surovin při druhování a jejich přítomnosti je většinou nežádoucí. Je to olovo, vizmut, antimon, arsen, bor, hliník, vanad, zirkon a nejedná-li se o legující přísadu též chrom, cín a titan.

Primární (hlavní) prvky (uhlík, křemík, síra, fosfor a mangan) jsou přítomny ve všech vyráběných typech tvárné litiny. Typické složení tvárné litiny je následující: 3,65% C, 2,40% Si, 0,01% S, 0,02% P a 0,40% Mn [1]. Uhlíkový ekvivalent (CE) je mnohem vyšší a obsah síry mnohem nižší, než-li u běžných šedých litin. Vzájemná působnost uhlíku a křemíku činí nezbytným sledovat vlivy těchto prvků současně přesto, že jejich individuální vliv je také velmi významný a nutno jej brát v potaz.

## **2.4 Litina s kuličkovitým grafitem a zvýšeným obsahem Si**

Křemík i uhlík jsou energetickými grafitizátory. Zvyšuje-li se jejich obsah v grafitické litině, rostou grafitové lupínky a mechanické vlastnosti se velmi zhoršují. Proto má být celkové ekvivalentní množství uhlíku v šedé litině co nejmenší a u jakostních očkovaných litin se pohybuje kolem 3,40 % [1].

U litiny s kuličkovým grafitem tomu tak není. Uhlík, který je vyloučen v podobě kulovitých útvarů – zrn grafitu, narušuje díky svému malému povrchu základní kovovou hmotu litiny jen nepatrně a nepůsobí vrubovým účinkem na základní hmotu v níž je uložen, jako lupínkový grafit. Vzájemný účinek křemíku a uhlíku na některé vlastnosti tvárné litiny vyjadřuje tzv. Hendersenův diagram, viz *obr. 2-3*.



Obr. 2-3 Hranice optimálního složení křemíku a uhlíku v litině (Henderson) [1]

Zatímco u běžně vyráběných odlitků z LKG se obsah uhlíku pohybuje v rozmezích 3,0 % až 4,0 %, pak u tenkostěnných odlitků pro směrnou tloušťku stěny cca 3,5 mm je optimální udržovat obsah Si v rozmezích 3,5 až přes 4,0 %, a pro tlustostěnné odlitky (nad 40 mm a více) po hranici 3,5 % Si [1].

Během tuhnutí tvárné litiny je tvorba grafitu doprovázena objemovými změnami, takže pokud klesá v litině množství křemíku a uhlíku, zvětšuje se smrštění a tím i potřeba doplňování tekutého kovu.

#### 2.4.1 Metalurgie litiny s kuličkovitým grafitem s vyšším obsahem Si

Křemík ovlivňuje strukturu základní kovové hmoty. Obecně se u LKG udržuje obsah křemíku v rozmezích 1,80 % až 2,80 %, ačkoliv je možný i značně větší rozptyl (například u litiny vzdorné opalu se obsah v litině zvyšuje až na 6,0 % Si) [1]. Vzhledem k tomu, že je

křemík silný grafitizátor, jeho nižší obsah v litině podporuje vznik karbidů, což se může projevit zápalkami v rozích a na hranách odlitku, ale i přímo ve struktuře jako mezibuněčné a osovité karbidy. Křemík zvyšuje počet grafitových zrn, snižuje velikost buněk a potlačuje vznik karbidů (ačkoliv tento účinek je časově omezen, neboť též závisí na doznívajícím účinku očkovací látky), což se realizuje efektním sekundárním očkováním. Zvyšující se počet grafitových zrn je obvykle doprovázen vyšším obsahem uhlíku a křemíku, předběžně zpracované základní litiny grafitem, nebo ferrosiliciem anebo očkováním litiny ferrosiliciem.

Během relativně pomalého ochlazování (buď ve stavu odlití, normalizaci nebo vyžhání) tvárné litiny, v rozmezích kritické teplotní oblasti, transformuje se austenit v oblasti kolem grafitových zrn na ferit. Množství feritu ve struktuře závisí na rychlosti ochlazování (čím pozvolnější ochlazování, tím větší množství feritu) a složení austenitu (všechn křemík je přítomen v austenitu a vyšší obsah křemíku vede k vyššímu obsahu ferritu).

#### **2.4.2 Mechanické vlastnosti litiny s kuličkovitým grafitem a zvýšeným obsahem Si**

Pod kritickou teplotou, je všechn křemík rozpuštěn ve feritu a ovlivňuje jeho vlastnosti. Na tvar grafitu nemá, až do obsahu 4,00 %, prakticky žádný vliv. [1] Zvětšuje však po určité hranici pevnost a tvrdost feritu a potlačuje vznik perlitu. Při zvýšeném obsahu křemíku o 0,1 % ve feritické tvárné litině, se zvyšuje pevnost a mez průtažnosti o cca 6 až 10MPa a tvrdost o cca 3 HB [1].

Po odlití má LKG největší pevnost a tažnost při obsahu cca 1,5 až 3 % křemíku. Po vyžhání stoupá se stoupajícím obsahem křemíku pevnost a tvrdost tvárné litiny, ale klesá tažnost. Feritická tvárná litina s obsahem asi 3 % Si má tvrdost 170 až 180 HB, tedy o cca 40 až 60 jednotek vyšší, než u litiny s nízkým obsahem křemíku [1]. Přitom je také pevnost této litiny vyšší než pevnost na příklad feritické temperované litiny. To je způsobeno vedle vhodného tvaru grafitu hlavně rozpouštěním křemíku ve feritu, to je vznikem tak zvaného silikoferitu, který je mnohem pevnější a tvrdší než normální ferit.

Se snižujícím obsahem křemíku se snižují pevnostní charakteristiky, to je pevnost a mez pevnosti tvárné litiny. Proto k zajištění vyšší rázové houževnatosti, při zachování dobrých mechanických vlastností, nemá obsah křemíku přestoupit hodnotu 2,5 % Si a klesnout pod 2,0 % Si [1].

Vliv obsahu křemíku na vlastnosti tvárné litiny je též závislý na obsahu manganu. Při nízkém obsahu manganu, zvyšuje křemík ve stavu po odlití pevnost a mez průtažnosti feritické tvárné litiny, zatímco při obsahu Mn 0,40 %, při vyšším objemu perlitu ve struktuře, vzrůstající obsah křemíku snižuje v tvárné litině pevnostní hodnoty [1]. Ve vyžíhaném stavu závisí mechanické vlastnosti na úrovni obsahu manganu. Vliv obsahu křemíku je však výrazný.

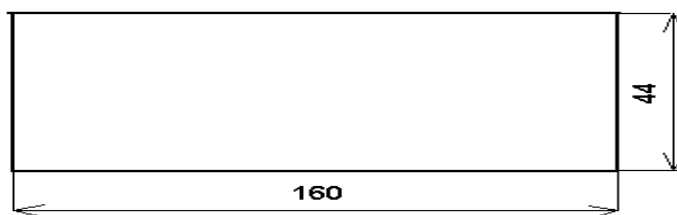


### 3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST PRÁCE

Experimenty prováděné v této bakalářské práci byly zaměřeny na sledování struktury jednoduchých odlitků tvaru desky vyrobených z litiny s vyšším obsahem křemíku s ohledem na vybraný způsob přípravy, metalurgii a odlévané taveniny do pískové formy z bentonitové směsi za účelem výroby odlitků jednoduchého tvaru s různou tloušťkou stěny odlitku.

#### 3.1 Popis výroby formy

Při zkoumání struktury odlitku LKG byl navržen odlitek ve tvaru obdélníkové destičky. Bylo odlito 5 ks destiček, přičemž každá destička měla jiný tloušťku. Tloušťky zkušebních těles byly nevrženy 3, 4, 5, 8 a 10 mm. Základní rozměry destičky jsou uvedeny na obrázku 3-1. Pro tuto bakalářskou práci byly nakonec vybrány 2 typy destiček. Destička o tloušťce 3 mm a destička o tloušťce 10 mm.



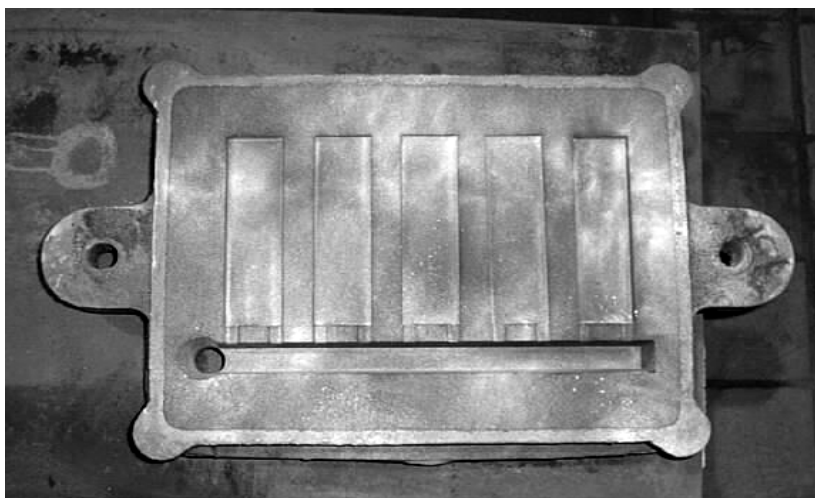
*Obr. 3 –1 Základní tvar zkušebních těles*

Prostor v rámu, byl při návrhu zkušebních tělísek, reps. odlitků, využit tak, že těchto pět odlitků bylo připojeno čelní plochou ke struskováku, což je vidět na *obr.3 -6*. Vůči vtokovému kanálu bylo voleno pořadí desek. Pořadí desek bylo následující: nejdříve 10 mm, poté destičky o tloušťce 3, 4, 5 a 8 mm.

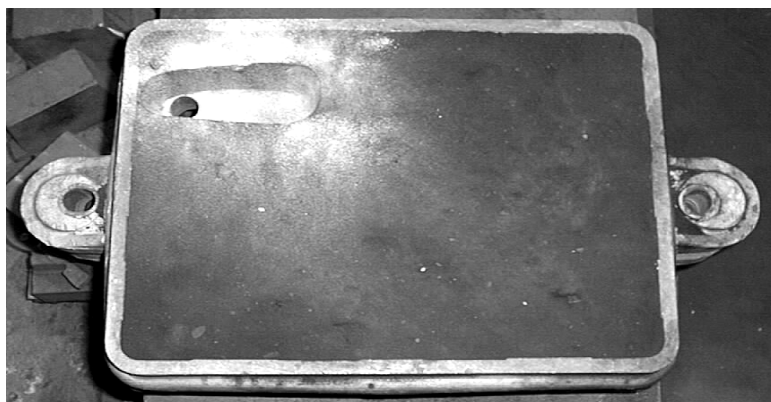
Kovový model byl ručně zaformován do dvou rámu o rozměrech 400 x 300 x 100 mm. Spodní rám byl zarovnán formovací směsí a tvořil pouze spodní plochu odlitků. Ve svrchním rámu byl líc formy postříkán vodným roztokem melasy.

Pohled na dělicí plochu spodní části slévárenské formy je uveden na obrázku 3 – 2.

Dutina spodní formy obsahuje zkušební tělíska s tloušťkou zleva : 10, 3, 4, 5 a 8 mm (vše tvaru desky 160 x 44 mm). Po přiklopení vrchní desky je forma připravena k odlévání. Připravená forma je vidět na *obr.3–3*.



*Obr. 3 – 2 Pohled na dělicí plochu spodní části slévárenské formy*



*Obr. 3 – 3 Slévárenská forma připravená k odlévání*

Byla použita bentonitová formovací směs. Tato formovací směs byla navržena s ohledem na běžné podmínky ve slévárnách. Ostřivem byl křemičitý písek Střeleč T2S. Pojivem byl bentonit Speciál 550 (7 hmot. %). Jako přísada, zlepšující vlastnosti formovacích směsí byla použita kamenouhelná moučka (1 hmot. %). Obsah vody ve formovací směsi byl 3 %.

*Tab. 3.1 Průměrné hodnoty vybraných vlastností použité formovací směsi*

Hustota [kg. m <sup>-3</sup> ]	Pevnost v tlaku [MPa]	Prodyšnost [j. p. SI]	d <sub>50</sub> [mm]
1550	0,051	334	0,27

V *tab. 3.1* jsou průměrné hodnoty formovacích směsí. Prodyšnost vzorků byla stanovena na přístroji typu LP a pevnost na přístroji typu LRu. Velikost zrn ostřiva formovací směsi byla stanovena síťovým rozborem. Byla též vypočítána i hustota formovací směsi. Všechny zkoušky byly prováděny na standardních vzorcích v laboratoři KSM-TU Liberec.

### 3.2 Příprava a tavení kovové vsázky

Vsázkový materiál byl pro všechny tavby shodný. Tvořilo ho surové železo s obchodním názvem SOREL. Chemické složení surového železa Sorel bylo následující:

*Tab. 3.2 Chemické složení surového železa SOREL*

Fe [%]	C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Ni [%]
95,48	4,23	0,15	0,013	0,026	0,01	0,007

Očkování proběhlo dvoustupňově. Vzhledem k úpravě chemického složení se nejdříve očkovalo grafitizačním očkovadlem FeSi75 a poté následně očkovadlem Superseed. Složení grafitizačních očkovadel je uvedeno v *tab.3.3*.

*Tab. 3.3 Chemické složení grafitizačních očkovadel*

		Fe [%]	Si [%]	Al [%]	Ca [%]	Sr [%]	Mg [%]	KVZ
<b>Očkovadlo</b>	FeSi 75	25	75					
<b>Očkovadlo</b>	Superseed	zbytek	75	max. 0,5	0,1	0,8		

Složení modifikačního činidla je uvedena v *tab.3.4*. Jako modifikační činidlo bylo použito MgFeSi. Pro posílení modifikačního účinku bylo přidáno ještě jedno hmotnostní procento (z hmotnosti modifikátoru MgFeSi) modifikátoru Cer – MM.

*Tab. 3.4 Chemické složení modifikačního činidla MgFeSi*

Si [%]	Mg [%]	Fe [%]
45	5	zbytek

Tavicím zařízením taveniny byla elektrická středofrekvenční kelímková indukční pec IO 40, jejímž výrobcem je firma Indukce, s.r.o. Vyzdívka pece se jmenuje SILICAMIX 7a. Vyzdívka je kyselá. Pánev byla navržena a vyrobena s ohledem na modifikační komůrku a výška pánve je dvojnásobkem jejího průměru. Maximální hmotnost taveniny v kelímku tavící pece je 40 kg. Tavenina byla připravena na slévárenském pracovišti TU Liberec Katedry strojírenské technologie, oddělení strojírenské metalurgie.

### 3.3 Odlití taveniny do formy

Při odlévání zkušebních vzorků bylo provedeno několik taveb. Několik experimentů nebylo úspěšných, ale jejich popis není náplní této bakalářské práce. Tato práce se zabývá jednou danou tavbou, která dle hodnot byla nejlépe vyhodnocena. Hmotnostní složení použitých vsázek pro odlévání těchto vzorků je uvedeno v *tab.3.5*. Pro tavbu byl použit stejný postup tavení, modifikace i grafitizačního očkování.

V peci bylo nataveno 30 kg základního materiálu, s označením Sorel. Z důvodu, že surové železo Sorel obsahuje malé množství křemíku pro výrobu LKG a to není výhodné pro tuto bakalářskou práci, jejíž úkolem je právě zkoumání LKG s vyšším obsahem Si, byl zvýšen obsah Si přidáním grafitizačního očkovačla FeSi75 (viz *tab.3.5*). Takto připravená vsázka byla zahřátá na teplotu 1500 až 1550 °C. Při těchto teplotách byla již vsázka kompletně

převedená do tekutého stavu. Teplota taveniny byla pravidelně kontrolována optickým pyrometrem METRA PYROMET. Zároveň před každým odléváním, byla lící pánve ohřívána na teplotu cca 600 °C. Lící pánve je současně i pánví modifikační a očkovací. Nejdříve bylo do komůrky modifikační pánve vloženo odpovídající množství předslitiny C-MM (množství, které bylo vloženo, je uvedeno v tab. 3.5) a na toto množství předslitiny byla dána příslušná dávka očkovadla FeSi75 (také viz *tab.3.5*). Poté byla všechna tavenina vlita do pánve. Po dvou minutách, které byly potřebné k rozpuštění modifikátoru, byla tavenina opět očkovaná grafitizačním očkovadlem Superseedem. Očkovadlo bylo nasypáno na hladinu a tavenina byla následně promíchána. Množství tohoto očkovadla je uvedeno v *tab.3.5*. Po tomto očkování, byla pyrometrem změřena teplota taveniny v peci a při dosažení lící teploty cca 1450 °C, tavenina byla připravená k okamžitému odlití do připravených forem. Po zchladnutí a také ztuhnutí taveniny byly odlitky vytlučeny z formy a od vtokové soustavy odděleny jednotlivé destičky, které byly dále podrobeny vyhodnocení tvrdosti a struktury. Součástí každé připravené tavby bylo i odlití tzv. „medailí“ k tomuto účelu byla použita měděná kokila.

V tabulce 3.6 je uvedeno výsledné chemické složení, které bylo zjištěno na analyzátoru v Komeční slévárně šedé a tvárné litiny v Turnově.

Tab. 3.5 Hmotnostní složení použitých vsázek pro odlití zkušebních odlitků z LKG

TAVBA	Vsázka [kg]							
	SOREL	Vrat	FeSi75	Očkovadla		Modifikátor		FeMn65
				FeSi75	Superseed	KVZ	MgFeSi	
<b>20</b>	6,19	19,00	0,044	0,151	0,1	0,0045	0,453	0,023

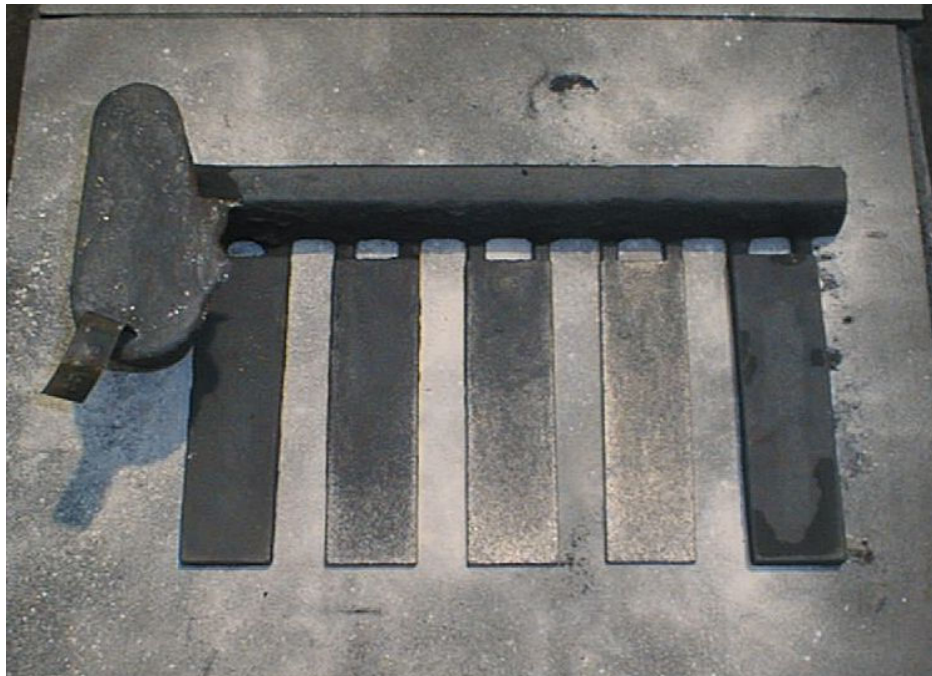
Tab. 3.6 Výsledné chemické složení tavby

<b>C [%]</b>	3,35	<b>Cr [%]</b>	0,016	<b>Ti [%]</b>	0,004
<b>Mn [%]</b>	0,25	<b>Ni [%]</b>	0,010	<b>Mg [%]</b>	0,041
<b>Si [%]</b>	3,70	<b>Cu [%]</b>	0,022	<b>As [%]</b>	0,000
<b>P [%]</b>	0,026	<b>Mo [%]</b>	0,002	<b>Sn [%]</b>	0,000
<b>S [%]</b>	0,008	<b>V [%]</b>	0,004	<b>Al [%]</b>	0,021



*Obr. 3-5 Elektrická středofrekvenční kelímková indukční pec IO 40*

Na obr.3-6 je uveden surový odlitek, který je tvořen z destiček, které jsou připojeny čelní plochou ke struskováku. Tloušťka destiček je uvedena výše v kapitole 3.1 (Popis výroby formy).



*Obr. 3-6 Surový odlitek LKG tvaru desky 160 x 44mm ( tl.10,3,4,5 8 mm – pohled zleva)*

### **3.4 Vyhodnocení získaných odlitků**

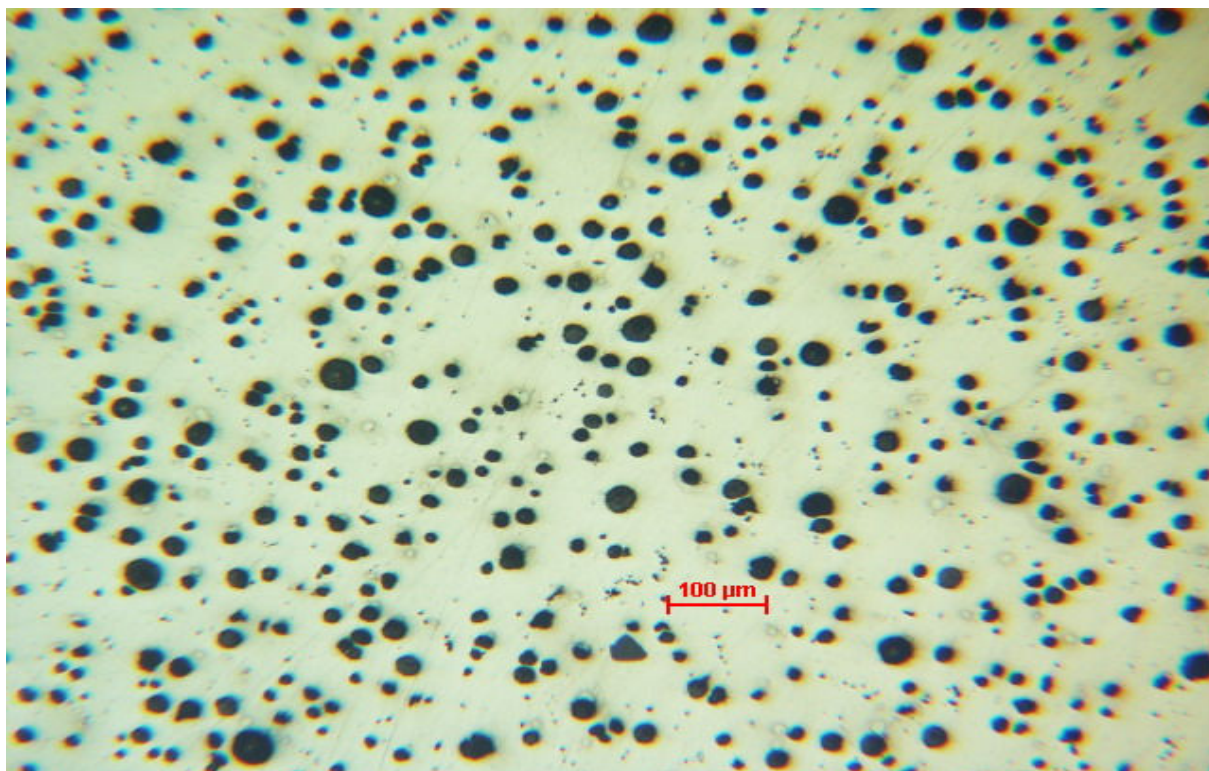
Vyhodnocení získaných odlitků, resp. zhodnocení provedené metalurgie a výroby odlitků bylo zaměřeno na metalografické sledování struktury a měření tvrdosti získaných odlitků.

#### **3.4.1 Sledování metalografické struktury**

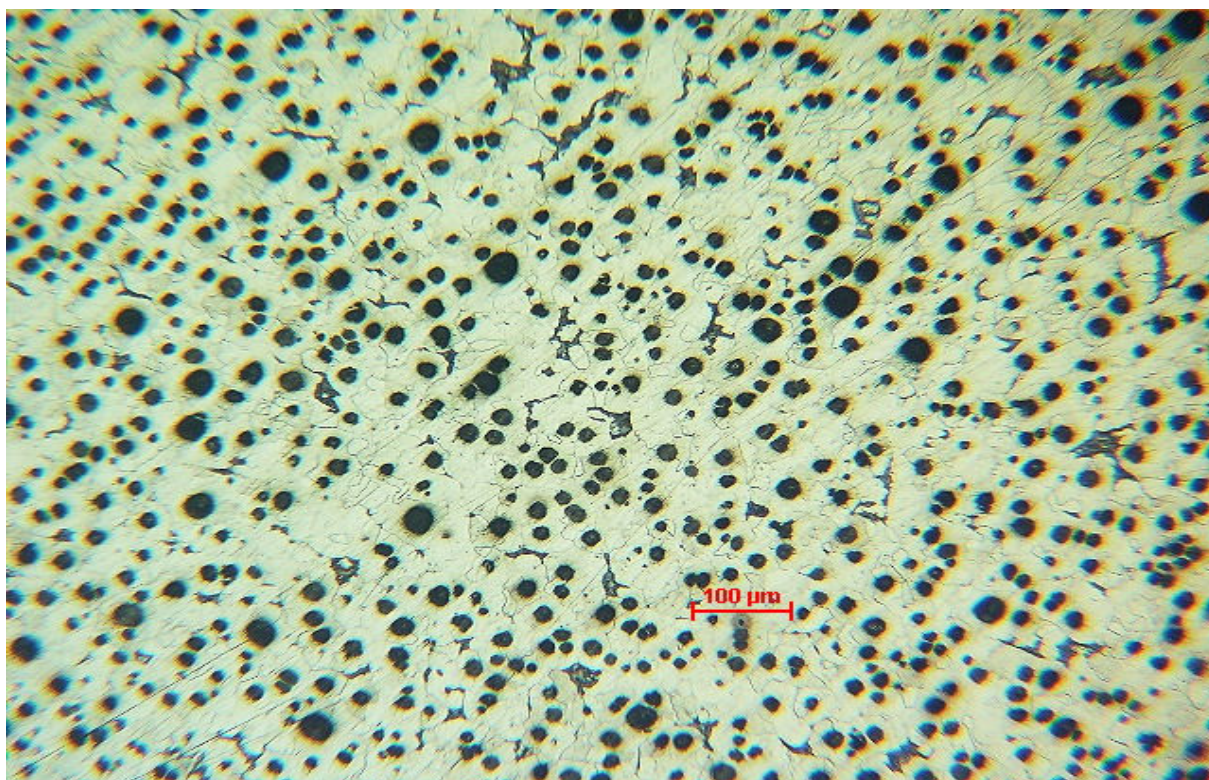
Pro sledování mikrostruktury odlitků byl použit světelný mikroskop NEOPHOT 21 (výrobce SRN). Pro tento účel byly vzorky připraveny běžným metalografickým způsobem. Vzorky byly uříznuty z tvaru desky 160 x 44 mm o tloušťce 3 mm a 10 mm. Toto oddělování se provádělo pomocí rámové pily za stálého chlazení. Dále se pak vzorky brousily běžným metalografickým způsobem, pod vodou brusnými papíry různé zrnitosti od nejhrubšího k nejméně hrubému. Poté byly vzorky přeleštěny.

Sledování struktury bylo provedeno v nenaleptaném stavu. Poté byly vzorky naleptány. Jako leptadlo byl použit 3 % roztok leptadla NITAL. Po naleptání byla sledována charakteristika základní hmoty. Vše bylo sledováno při zvětšení 100x. Vše bylo vyfoceno digitálním fotoaparátem firmy Nikon. Obrázky vybraných struktur jsou uvedeny na *obr. 3-7 až obr.3-10*.



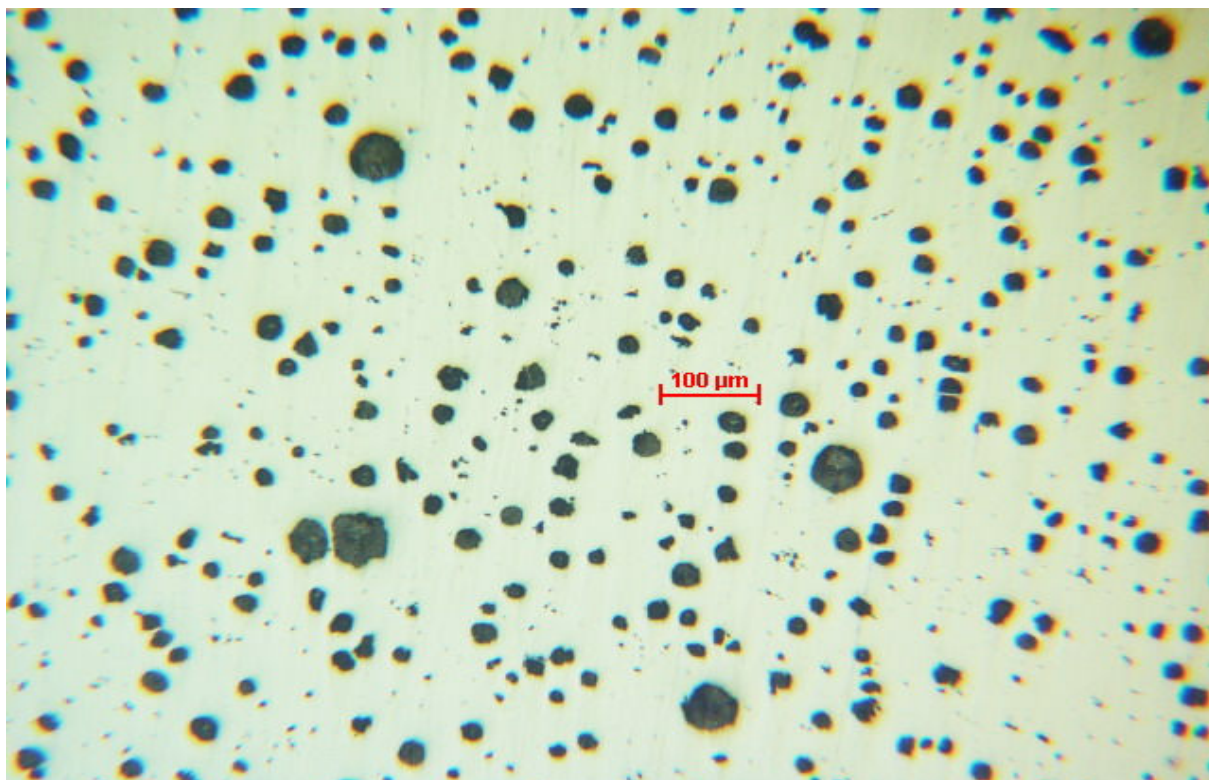


*Obr. 3-7 Mikrostruktura vzorku tl. 3 mm z tavby č.20, zvětšení 100x*

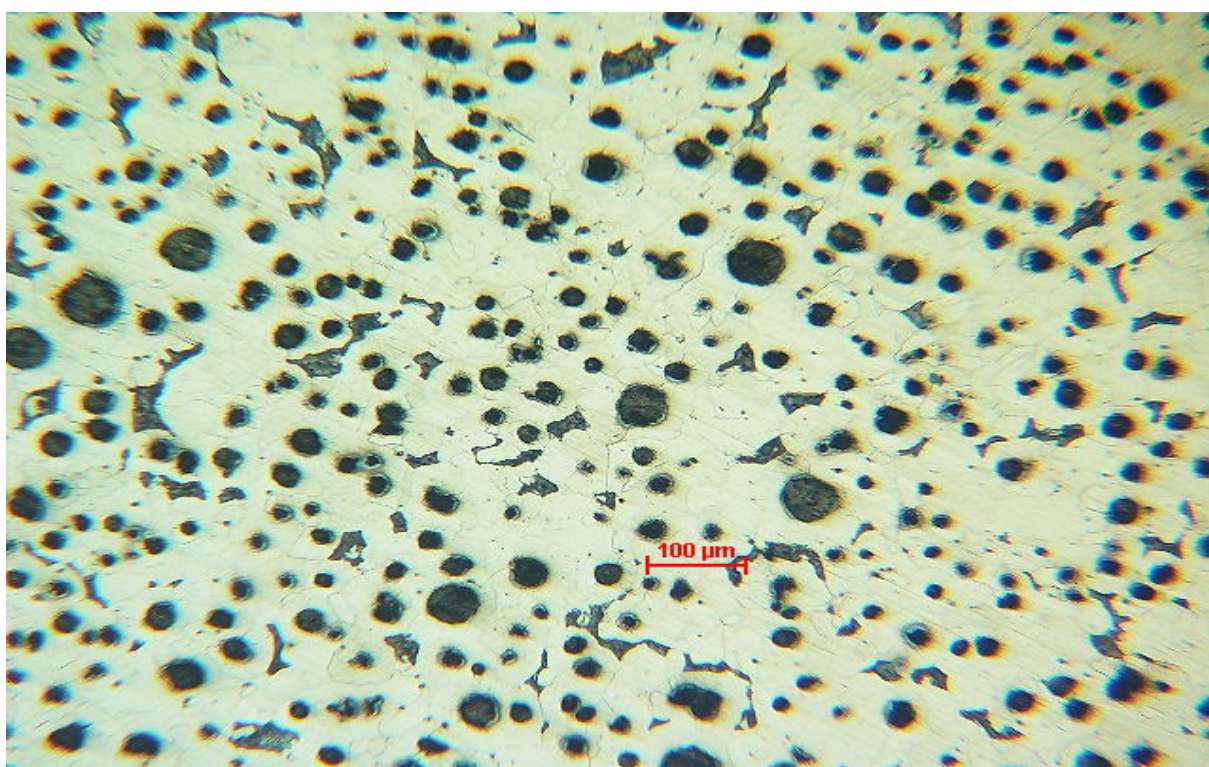


*Obr. 3-8 Mikrostruktura vzorku tl. 3 mm z tavby č.20 po naleptání 3 % roztokem Nitalu, zvětšení 100x*





*Obr. 3-9 Mikrostruktura vzorku tl. 10 mm z tavby č.10, zvětšení 100x*



*Obr. 3-10 Mikrostruktura vzorku tl. 10 mm z tavby č.10 po naleptání 3 % roztokem Nitalu, zvětšení 100x*

Na *obr.3-7* je vidět strukturu vzorku o tl. 3 mm v nenaleptaném stavu a při zvětšení mikroskopu 100x. Metalografickým pozorováním bylo zjištěno, že se jedná o strukturu litiny s kuličkovým grafitem. Dle rozložení, tvaru a typu grafitu můžeme dle značení pro určování typu, rozložení a hustoty určit typ grafitu VI-E-6. Tato struktura byla dosažena přidáním modifikačního činidla MgFeSi, kdy grafit zkrystalizoval do tvaru kuliček. Celkově bylo použito 0,453 kg tohoto modifikátoru.

Na *obr.3-8* je vidět strukturu vzorku o tl. 3 mm, ale již v naleptaném stavu. Vše bylo leptáno 3 % roztokem Nitalu. Po naleptání je patrné vyostření struktury a je vidět základní kovová hmota – feritická.

Na *obr. 3-9* je vidět strukturu vzorku již o tl. 10 mm. Opět se jedná o nenaleptaný stav. Opět je zřejmý kuličkový grafit typu VI – F – 7. Rozložení hustota grafitu je menší.

Na *obr.3-10* vidíme strukturu naleptaného vzorku o tl. 10 mm. Vše je opět leptáno 3 % roztokem Nitalu. Výsledná kovová hmota je feritická.

Tavba přinesla očekávané výsledky. Struktura litiny je opravdu litina s kuličkovým grafitem a feritickou maticí. Díky této feritické matici a díky vyššího obsahu Si je tato litina velice tvárná a to z důvodu toho, že je schopna spolknout nárazovou energii při deformaci a tudíž je rozšířen okruh použití.

### **3.4.2 Měření tvrdosti odlitků**

Pro měření tvrdosti grafitické litiny byly použity vzorky, které byly uříznuty z tvaru desky 160 x 44 mm o tloušťce 3 mm a 10 mm. Tvrdost byla měřena na tvrdoměru firmy Karl Zeiss. Měření tvrdosti bylo provedeno Brinellovou zkouškou tvrdosti, ve které je indentorem kulička ze zakalené chromové oceli. Průměr kuličky byl 10 mm, zatížení 29430 N (3000kp). Zatížení mělo dobu trvání cca 30 s. Dva na sebe kolmé průměry získaných vtisků příslušných ploch byly odečítány pomocí optické jednotky. Tato jednotka je součástí každého tvrdoměru pro Brinellovu zkoušku. Z těchto dvou hodnot byla vypočtena střední hodnota tvrdosti. Zjištěné hodnoty jsou pro oba typy tloušťek odlitků uvedeny v tab. 3.7.

Tab. 3.7 Tvrdosti odlitých destiček tloušťky 3 a 10 mm

Tloušťka zkušební destičky [mm]	Tvrdost [HB]					x	s	v
3	195	202	191	204	198	198	5,24	0,0264
10	191	193	193	202	209	197,60	7,67	0,0388

Před měření tvrdosti byly vzorky upraveny broušením, které musí být velmi pomalé. Nesmí dojít k přílišnému zahřátí a tím pádem k ovlivnění základní kovové hmoty destičky. Broušení se provádí z důvodu, aby pro samotné měření a následné vyhodnocování průměrů vtisků měla destička odpovídající hladkost a také aby byl odstraněn vliv licí kůry na exaktnost měření. Při vyhovující hladkosti je také lepší kontrastnost vtisku při jeho prověřování. Z důvodu, aby bylo možno provádět měřicí vtisky zhruba 10 mm od obou okrajů destiček, byly vzorky broušeny jak na straně vtoku tak i na straně odlehlé.

Naměřené hodnoty tvrdosti jsou uvedeny v tab.3.7. Tam jsou také uvedeny spočtené statistické hodnoty dle následujících vztahů:

a) Výběrový aritmetický průměr:

$$x = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \quad (3.1)$$

x – výběrový koeficient [-]

n – počet hodnot [-]

$x_i$  – součet hodnot [-]

b) Směrodatná odchylka:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - x)^2} \quad (3.2)$$

s – směrodatná odchylka [-]

c) Variační koeficient:

$$v = \frac{s}{x} \quad (3.3)$$

v – variační koeficient [-]

Z naměřených hodnot Brinellovou zkouškou tvrdosti je patrné, že s rostoucí tloušťkou vzorku, klesá jen nepatrně klesá tvrdost a celkově lze konstatovat, že tvrdost se pohybuje kolem hodnoty 198HB.

## 4. DISKUZE VÝSLEDKŮ

Výsledky obsažené v této práci ukazují směr, který je možno uplatňovat při přípravě, metalurgii a odlévání litiny s kuličkovým grafitem s vyšším obsahem Si. Tato litina začíná mít uplatnění při výrobě automobilových dílů a je možná perspektivním materiálem pro práci při nižších teplotách.

Během prováděných experimentů byly mimo jiné i potvrzeny stávající poznatky o výrobě litiny s kuličkovým grafitem a rozšířeny o nové poznatky výroby tenkostěnných odlitků (3 až 10 mm) z této litiny s vyšším obsahem Si..

Pro výrobu litiny s kuličkovým grafitem bylo použito čisté surové železo „Sorel“, vratný materiál z LKG. Jako očkovač bylo použito očkovač FeSi75a následně očkovač Superseed. Jako modifikační činidlo bylo použito MgFeSi. Pro posílení modifikačního účinku bylo přidáno ještě jedno hmotnostní procento (z hmotnosti modifikátoru MgFeSi) modifikátoru Cer – MM.

Tavby byly prováděny v elektrické indukční peci, která se pro tavení litiny podmínkách naší katedry osvědčila, díky své možnosti dobře regulovat chemické složení a teplotu.

Jak je z praxe známo, výroba litiny s kuličkovým grafitem je bez předchozích zkušeností velmi náročná, i když dnes existuje řada publikací, které popisují různé technologie prováděné modifikace a očkování. Metalurgie a výroba litiny s kuličkovým grafitem s vyšším obsahem křemíku také do jisté míry ukazuje na náročnost přípravy taveniny i celého metalurgického procesu. Správnost provedení výše uvedené tavby (bylo provedeno v rámci řešení této bakalářské práce), bylo potvrzeno zjištěním výsledného chemického složení litiny, viz tab. 3.6.

Také obrázky z provedeného metalografického rozboru potvrzují výrobu litiny s kuličkovým grafitem. U odlitku tl. 3 mm byl zjištěn grafit typu VI-E-6, který se nachází v feritické hmotě s velmi malým množstvím perlitu. Podobně tomu bylo u vzorku s tloušťkou 10 mm. Zde byl zjištěn typ grafitu VI-F-7 také s feritickou kovovou hmotou s nepatrným množstvím perlitu. Velmi příznivé výsledky je možno vyslovit na základě změřené tvrdosti, která dosahuje hodnoty cca  $HB = 198$ .

Na závěr je nutné podotknout, že zajištění správného vstupního chemického složení tavby je velice náročné. Musí se provést výpočet s ohledem na množství vsázkových surovin

a současně se musí přesně dbát na správné navážení vsázky, modifikátoru a očkovadla, jinak výsledky tavy mohou být zkreslené. V této souvislosti je nutno ještě poznamenat, že prováděné výpočty chemického složení nebyly předmětem řešení této bakalářské práce. Jsou prováděny v rámci řešení diplomové práce Libora Junka a doktorské práce Ing. Jana Šmrhy.

## 5. ZÁVĚR

Úkolem této bakalářské práce bylo řešení LKG s vyšším obsahem Si. Bakalářská práce je rozdělena do dvou částí. Nejprve na část rešeršní, která je zaměřena na litinu s vyšším obsahem Si a poté na část experimentální, která se zaměřuje na úspěšnou přípravu tavby a provedení odlití odlitků tvaru desky 160 x 44 x 3 a 160 x 44 x 10 mm z LKG s vyšším obsahem Si.

Ze získaných poznatků a výsledků řešení této bakalářské práce lze vyslovit dílčí závěry:

1. Pro výrobu litiny s kuličkovým grafitem je třeba použít indukční středofrekvenční pec s přesným stanovením surovin a jejich množství pro vedení tavby. V tomto smyslu se osvědčila vsázka tvořena 6,19 kg Sorelu; 19 kg vratu z LKG, 0,044 kg FeSi75; 0,023 kg FeMn65. Očkovadlo je tvořeno 0,151 kg FeSi75 a 0,10 kg Superseed. Modifikátor 0,0045 kg KVZ a 0,453 kg MgFeSi.
2. Současně je nutno použít pro modifikaci pánev předeřátou na teplotu cca 600 °C, která umožňuje sendvičovou (polévací) metodu modifikace.
3. Použití pískové bentonitové formy pro výrobu odlitků tvaru desky 160 x 44 mm o tloušťce 3, 4, 5, 8, 10 mm je dostačující a napomáhá získání odlitků z LKG s vyšším obsahem Si požadované struktury a tvrdosti.
4. Získané odlitky tvaru desky 160 x 44 mm, tloušťky 3 a 10 mm vykazují požadovanou strukturu LKG (grafit je typu VI – E – 6 až VI - F - 7) s feritickou základní kovovou hmotou s nepatrným množstvím feritu.
5. Tvrdost sledovaných odlitků litinových destiček tloušťky 3 a 10 mm dosahuje hodnotu cca HB=198 (při použití kuličky Ø 10 mm, zátěžná síla 29430N – tj.3000 kp, čas 30 s).

## 6. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] OTÁHAL, L.: Tvárná litina, litina s kuličkovým grafitem, CD ROM, (Technicko-ekonomické poradenství, Otáhal Vlastislav, Brno, Horská 27).
- [2] NOVÁ I., NOVÁKOVÁ I., BRADÁČ, J.: Technologie I. Slévání a svařování. [Skripta]. FS, KSP – TU v Liberci, 2006.
- [3] ROUČKA, J.: Metalurgie litin. [Skripta]. VUT Brno 2000.
- [4] BOUCNÍK, P: Vše co jste chtěli vědět o litinách (online). Internetový odkaz: [www.mujweb.cz/veda/pavelb/kap4.htm](http://www.mujweb.cz/veda/pavelb/kap4.htm) – kapitola – malé pojednání o litinách
- [5] BOUCNÍK, P: Vše co jste chtěli vědět o litinách (online). Internetový odkaz: <http://www.boucnik.cz/litiny.htm>.
- [6] ŠMRHA, J.: Zásady výroby tenkostěnných odlitků u litiny s červíkovitým grafitem pro automobilový průmysl. [Diplomová práce]. FS-KSP, TU v Liberci 2005.
- [7] PODRÁBSKÝ, T., Pospíšilová, S.: Struktura a vlastnosti grafitických litin, VUT Brno 2006  
(online): <http://ime.fme.vutbr.cz/files/Studijni%20opory/savgl/index.php?chapter=10>
- [8] SKOČOVSKÝ, I., ŠIMAN, I.: Štruktúrná analýza liatin. 1. vyd. Bratislava, 1989.

## **Prohlášení**

Byla jsem seznámena s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb. O právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracovala samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum: 4.1.2008

Podpis: Miroslava Schořová



## **Declaration**

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. applies to my thesis in full, in particular section 60. School Work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL.

If I use my thesis or grant a licence for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact; in this case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my thesis to the full amount.

I compiled the thesis on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultation with the head of the thesis and a consultant.

Date : 4.1.2008

Signature: Miroslava Schořová